

Jakub Majewski 238902

Termin zajęć: Pt. 17:05

Prowadzący zajęcia: Dr inż. Zbigniew Buchalski

Termin oddania sprawozdania: 21.12.18r.

# Sprawozdanie

Programowanie Efektywnych Algorytmów

Projekt nr 2

Implementacja i analiza efektywności algorytmu symulowanego  
wyżarzania dla problemu TSP

## I. Wstęp teoretyczny

Algorytm symulowanego wyżarzania (SW, ang. simulated annealing (SA)) jest algorytmem heurystycznym. Jego nazwa pochodzi od operacji obróbki cieplnej metali wykorzystywanej w metalurgii, która polega na nagrzeniu materiału do określonej temperatury, wytrzymaniu przy tej temperaturze oraz następnie powolnym studzeniu. W algorytmie występują następujące elementy:

- Temperatura początkowa i temperatura aktualna.
- Aktualny stan obiektu (aktualne rozwiązanie) oraz nowy proponowany obiekt na miejsce starego.
- Energia obiektu aktualnego i proponowanego na jego miejsce opisująca jakość rozwiązania.
- Funkcja ochładzająca obiekt (zmniejszająca temperaturę) np. mnożenie temperatury przez stałą.
- \*Temperatura minimalna jeżeli warunku końcowego nie określa konkretny czas wykonywania).

Uproszczony wygląd algorytmu:

```
C = init(C) // Zainicjowanie pierwszego rozwiązania (w dowolny sposób)
for T = Tmax to Tmin: // Aktualna temperatura T
    Ec = E(C) // Energia aktualnego obiektu
    N = next(C) // Stworzenie (zapropozowanie) nowego obiektu
    (rozwiązania) na miejsce starego
    En = E(N) // Energia nowego obiektu
    dE = En - Ec // Różnica energii
    if dE > 0: // Logiczny wybór lepszego rozwiązania
        C = N
    else if exp(dE/T) > rand(0,1): // Heurystyka
        C = N
```

Uproszczony wygląd algorytmu zastosowanego w zadaniu:

```
C = init(C) // Zainicjowanie (wygenerowanie) pierwszego rozwiązania (w
dowolny sposób)
while(duration(current_time)): // Planowany czas wykonywania algorytmu
    T = T * a // Zmniejszanie temperatury mnożąc ją przez stałą
    Ec = E(C) //  $E(c) = -distance(c)c$ 
    N = next(C) // Pojedynczy swap dwóch losowych elementów rozwiązania
    En = E(N)
    dE = En - Ec
    if dE > 0:
        C = N
    else if  $\exp(dE/T) > \text{rand}(0,1)$ :
        C = N
```

## II. Opis najważniejszych klas w projekcie

Rand - generowanie liczb pseudolosowych.

Graph - wczytywanie i przechowywanie grafu.

SimAnn - ciało algorytmu SW.

SimAnn::State - klasa bazowa dla obiektu ochładzanego w algorytmie SW.

SimAnnStateTSP : SimAnn::State - klasa dla obiektu ochładzanego w algorytmie SW.

### III. Wyniki:

#### 1a. Plik ftv47.atsp

Wsp. a = 0.999999

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 48

Najkrótsza znana ścieżka = 1776

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	1954	59999	0	10.02%
Test 2.	1919	59999	0	8.05%
Test 3.	1864	59999	0	4.95%
Test 4.	1924	59999	0	8.33%
Test 5.	1887	59999	0	6.25%
<b>Test 6.</b>	<b>1841</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>3.65%</b>
Test 7.	1939	59999	0	9.17%
Test 8.	1918	59999	0	7.99%
Test 9.	1940	59999	0	9.23%
Test 10.	1955	59999	0	10.07%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 39 45 16 15 44 19 20 22 42 43 41 2 28 27 33 9 1 25 0 11 8  
3 29 4 24 6 5 30 31 7 32 12 23 14 35 36 46 34 13 17 18 38 37 10 26 47 40 21

## 1b. Plik ftv47.atsp

Wsp. a = 0.9999

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 48

Najkrótsza znana ścieżka = 1776

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	2123	59999	0	19.53%
Test 2.	2253	59999	0	26.85%
Test 3.	2380	59999	0	34%
Test 4.	2167	59999	0	22.01%
Test 5.	2175	59999	0	22.46%
Test 6.	2242	59999	0	26.23%
<b>Test 7.</b>	<b>2092</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>17.79%</b>
Test 8.	2167	59999	0	22.01%
Test 9.	2181	59999	0	22.8%
Test 10.	2217	59994	0	24.83%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 13 34 17 18 25 0 5 30 29 4 24 3 28 2 27 33 9 6 32 10 1 42  
43 41 26 38 37 11 8 31 7 12 23 14 35 15 44 19 20 22 47 40 21 39 45 16 36 46

## 1c. Plik ftv47.atsp

Wsp. a = 0.99

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 48

Najkrótsza znana ścieżka = 1776

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	2524	59989	0	42.11%
Test 2.	2597	59988	0	46.22%
Test 3.	2430	59994	0	36.82%
Test 4.	2518	59991	0	41.77%
Test 5.	2450	59999	0	37.95%
Test 6.	2544	59989	0	43.24%
Test 7.	2415	59997	0	35.97%
Test 8.	2569	59989	0	44.65%
<b>Test 9.</b>	<b>2390</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>34.57%</b>
Test 10.	2432	59999	0	36.93%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 13 11 8 6 32 12 17 18 38 40 42 26 47 21 36 46 23 7 31 3  
28 2 43 41 22 37 5 30 29 4 24 27 33 9 10 1 25 0 20 39 45 16 15 44 19 14 35 34

## 2a. Plik ftv170.atsp

Wsp. a = 0.999999

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 171

Najkrótsza znana ścieżka = 2465

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
<b>Test 1.</b>	<b>3752</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>52.21%</b>
Test 2.	3810	59999	0	54.56%
Test 3.	3827	59999	0	55.25%
Test 4.	4116	59999	0	66.97%
Test 5.	3982	59999	0	61.54%
Test 6.	3890	59999	0	57.8%
Test 7.	3950	59999	0	60.24%
Test 8.	3854	59999	0	56.34%
Test 9.	4093	59998	0	66.04%
Test 10.	4011	59999	0	62.71%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 159 15 12 11 75 73 78 82 79 80 81 0 77 170 46 53 52 47 44 42 41 155 156 39 38 37 36 158 21 17 13 14 152 151 160 161 150 25 24 74 76 10 9 8 7 4 3 2 1 49 50 71 85 69 70 167 67 68 62 57 58 43 54 55 56 64 63 66 72 168 60 84 83 108 166 93 86 87 153 154 92 95 98 163 165 97 105 106 107 109 110 132 112 111 169 133 5 131 130 128 129 136 137 147 142 143 144 148 149 6 140 145 146 122 121 120 119 117 116 115 134 141 139 138 135 124 118 125 126 127 164 113 114 104 103 102 162 123 101 100 99 96 94 91 90 89 88 65 61 59 51 48 45 40 34 35 33 157 32 31 30 29 28 27 26 23 22 20 19 18 16

## 2b. Plik ftv170.atsp

Wsp. a = 0.9999

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 171

Najkrótsza znana ścieżka = 2465

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	5492	59997	0	122.79%
Test 2.	5266	59999	0	113.63%
Test 3.	5603	59999	0	127.3%
Test 4.	4949	59999	0	100.77%
Test 5.	5277	59999	0	114.07%
<b>Test 6.</b>	<b>4654</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>88.8%</b>
Test 7.	5316	59999	0	115.65%
Test 8.	5099	59999	0	106.85%
Test 9.	5081	59999	0	106.12%
Test 10.	5236	59999	0	112.41%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 148 149 26 19 75 37 158 20 17 16 159 15 14 151 140 139 138 119 117 116 115 113 104 97 105 106 107 166 108 109 110 169 133 141 144 145 129 114 165 90 91 93 67 68 51 48 36 32 31 30 33 157 35 38 50 60 71 83 86 87 65 64 63 66 61 62 57 56 55 43 44 40 156 34 27 28 29 13 160 150 25 24 23 22 21 143 146 124 121 120 96 94 92 70 167 69 84 85 153 88 89 154 95 98 101 100 99 163 103 102 162 123 122 118 125 126 127 164 112 81 79 82 80 5 4 3 2 9 8 7 6 1 78 72 168 170 49 59 58 54 53 52 47 46 45 42 41 155 39 73 77 0 111 132 131 142 152 161 18 12 11 74 76 10 134 135 130 128 136 137 147

## 2c. Plik ftv170.atsp

Wsp. a = 0.99

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 171

Najkrótsza znana ścieżka = 2465

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	5303	59999	0	115.13%
Test 2.	5232	59999	0	112.25%
Test 3.	5825	59999	0	136.3%
Test 4.	5192	59999	0	110.62%
<b>Test 5.</b>	<b>5004</b>	<b>59998</b>	<b>0</b>	<b>103%</b>
Test 6.	5121	59999	0	107.74%
Test 7.	5147	59999	0	108.8%
Test 8.	5546	59999	0	124.98%
Test 9.	5635	59999	0	128.6%
Test 10.	5644	59999	0	128.96%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 161 25 26 27 16 159 15 4 0 37 20 19 18 12 11 74 73 78 77  
1 2 9 3 169 133 132 112 111 125 126 127 81 80 79 82 48 47 52 51 50 60 153 89 88 65 66  
61 71 83 114 104 103 102 162 123 122 121 120 118 116 115 92 86 85 69 84 62 57 58 54  
55 53 56 64 63 59 46 42 155 156 34 35 30 28 29 134 138 130 164 113 5 8 7 140 139 136  
137 147 148 149 24 23 22 32 31 41 33 157 36 158 75 76 10 150 160 151 152 6 135 128  
129 124 119 117 100 99 105 106 107 166 87 70 167 67 68 72 168 170 49 38 39 40 44 43  
45 21 17 13 14 145 146 101 163 165 97 96 95 98 94 91 90 154 93 108 109 110 131 141  
144 143 142



### 3a. Plik rbg403.atasp

Wsp. a = 0.999999

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 403

Najkrótsza znana ścieżka = 2755

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	2493	59997	0.0038	9.5%
Test 2.	2503	59998	0.0042	9.14%
<b>Test 3.</b>	<b>2526</b>	<b>59999</b>	<b>0.0045</b>	<b>8.31%</b>
Test 4.	2494	59999	0.0051	9.47%
Test 5.	2487	59998	0.0068	9.72%
Test 6.	2522	59999	0.0062	8.45%
Test 7.	2495	59999	0.0063	9.43%
Test 8.	2499	59998	0.0062	9.29%
Test 9.	2503	59999	0.0062	9.14%
Test 10.	2489	59999	0.0062	9.65%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 401 10 126 339 124 130 55 95 237 253 341 52 306 132 80 244 46 294 329 284 170 6 173 188 247 256 316 144 146 149 48 162 142 356 209 16 268 103 360 390 326 265 296 332 68 69 88 57 138 190 266 342 354 323 331 340 11 86 184 94 346 181 368 179 246 54 37 305 310 152 379 321 366 177 219 240 395 351 392 141 62 14 394 304 261 262 191 252 44 60 66 67 385 28 272 371 375 101 151 348 248 325 275 109 25 164 165 106 4 139 29 215 49 276 102 337 72 90 208 18 303 364 225 23 335 317 328 357 273 125 59 314 42 147 156 176 123 300 166 36 137 243 231 211 259 51 92 319 8 283 400 74 286 131 365 160 386 107 267 333 116 120 108 245 376 33 30 206 359 180 143 155 89 201 3 163 154 148 45 207 129 212 382 230 161 197 220 65 75 153 133 315 363 374 193 118 302 255 128 293 274 251 20 307 269 158 369 111 232 322 32 0 196 73 119 122 399 127 350 84 104 381 324 194 85 250 174 203 383 384 43 2 112 47 121 235 35 312 289 380 233 352 40 145 93 12 280 195 41 213 198 19 105 185 222 7 313 343 330 241 202 327 113 264 187 389 99 97 258 391 38 70 239 393 229 238 87 260 397 309 31 77 175 210 226 78 334 140 288 134 1 157 83 396 398 63 171 199 221 224 228 234 9 150 98 100 178 388 257 61 136 249 82 344 355 373 318 358 370 282 285 5 308 218 117 242 27 169 110 263 353 114 115 349 217 182 189 192 214 223 254 167 26 172 295 34 387 21 22 81 277 58 71 278 372 91 39 347 361 320 227 236 168 53 186 281 271 311 204 291 298 299 345 270 135 338 96 79 290 292 336 279 17 183 15 64 377 378 159 76 367 301 362 205 13 24 287 402 56 50 297 200 216

### 3b. Plik rbg403.atsp

Wsp. a = 0.9999

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 403

Najkrótsza znana ścieżka = 2755

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	2543	59999	0	7.69%
Test 2.	2491	59998	0	9.58%
Test 3.	2519	59999	0	8.56%
Test 4.	2526	59999	0	8.31%
Test 5.	2479	59999	0	10.01%
Test 6.	2514	59999	0	8.74%
Test 7.	2492	59998	0	9.54%
Test 8.	2526	59999	0	8.31%
<b>Test 9.</b>	<b>2557</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>7.18%</b>
Test 10.	2533	59999	0	8.05%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 313 255 128 343 284 170 76 152 175 55 311 337 303 364 116 120 301 177 359 106 289 321 336 65 131 350 358 370 61 107 328 357 271 126 167 269 158 369 111 386 2 16 268 139 224 19 3 164 356 209 83 371 375 14 229 238 29 355 373 46 267 333 73 310 153 249 316 54 37 332 195 28 272 351 108 56 50 144 146 149 59 314 197 220 203 218 247 82 4 184 339 157 263 353 79 377 342 354 119 52 401 7 159 18 63 171 142 145 104 94 115 306 132 325 226 230 248 395 84 43 352 40 122 138 190 208 15 64 317 294 329 330 251 34 150 101 151 80 244 187 389 99 309 74 286 379 291 298 276 253 98 100 178 36 62 360 292 366 21 22 81 173 188 38 26 172 97 315 205 231 288 13 137 383 384 9 93 341 277 58 338 192 123 340 41 372 282 285 182 320 382 78 71 228 234 393 23 185 174 12 280 135 256 392 141 189 67 166 1 124 85 5 304 165 180 204 363 374 69 114 96 88 237 198 200 216 300 385 154 156 176 281 274 264 133 225 394 308 344 223 254 24 112 241 362 380 194 376 33 89 302 381 324 233 45 207 70 239 193 279 17 183 103 48 162 232 296 305 8 283 250 222 68 30 206 390 148 161 87 6 215 49 299 345 214 31 77 57 278 213 270 211 20 307 44 60 66 346 181 246 117 242 258 391 105 129 39 347 92 257 287 402 102 259 51 361 400 53 186 191 252 266 399 118 201 261 262 75 367 147 275 265 368 179 260 397 10 95 243 134 35 312 168 349 387 0 196 335 212 227 236 327 113 47 121 235 318 290 348 388 219 240 136 217 334 140 210 326 109 295 199 221 42 396 398 72 90 127 293 273 125 110 143 155 25 163 245 365 160 319 323 331 91 322 32 130 202 27 169 11 86 297 378

### 3c. Plik rbg403.atsp

Wsp. a = 0.99

Czas wykonywania = 60000 ms

Temperatura początkowa = 403

Najkrótsza znana ścieżka = 2755

Lp. testu	Ścieżka	Czas znalezienia ścieżki	Temperatura końcowa	Błąd względny
Test 1.	2552	59997	0	7.36%
Test 2.	2560	59999	0	7.07%
Test 3.	2542	59999	0	7.73%
Test 4.	2546	59999	0	7.58%
<b>Test 5.</b>	<b>2584</b>	<b>59999</b>	<b>0</b>	<b>6.2%</b>
Test 6.	2552	59998	0	7.36%
Test 7.	2521	59999	0	8.49%
Test 8.	2541	59999	0	7.76%
Test 9.	2556	59998	0	7.22%
Test 10.	2533	59999	0	8.05%

**Najkrótsza znaleziona ścieżka:** 107 282 285 56 87 202 185 174 34 150 352 117 239 46 358 370 273 286 24 369 111 379 321 366 396 398 389 99 40 122 228 234 54 62 88 98 100 190 121 235 80 244 219 240 208 70 242 9 93 339 158 41 272 351 108 71 342 216 310 152 320 382 78 270 135 298 276 188 139 343 284 170 395 267 333 168 355 131 21 22 81 167 266 138 178 26 172 133 165 106 300 221 204 205 13 137 318 263 277 283 20 313 257 113 264 36 37 332 341 347 92 75 153 362 363 374 256 392 141 373 57 278 209 10 126 42 232 316 44 60 125 289 380 233 130 73 223 254 68 261 262 144 324 194 17 183 1 157 344 8 58 5 304 315 291 175 6 31 176 290 292 336 368 179 2 16 268 337 19 105 246 211 258 226 230 59 314 187 191 375 356 372 245 334 140 350 61 136 212 227 236 142 198 399 25 164 127 109 30 206 118 302 224 72 90 189 96 360 210 148 161 309 119 52 215 305 306 231 94 45 207 103 365 160 0 196 255 128 377 63 171 65 18 378 331 371 252 69 14 23 279 348 248 50 147 391 357 328 251 247 82 338 67 385 97 243 132 359 180 253 381 146 149 325 326 110 203 104 295 296 49 51 361 38 154 275 265 177 249 288 134 297 303 364 91 400 349 43 340 145 217 116 120 301 237 7 159 335 319 323 307 317 287 402 39 353 79 200 354 55 95 11 86 192 123 143 155 250 222 83 274 32 327 322 3 163 74 66 115 401 214 173 260 397 15 64 4 184 29 53 186 294 329 330 241 259 299 345 193 129 27 169 101 151 269 124 225 394 308 112 47 48 162 293 84 383 384 218 376 33 12 280 195 102 393 229 238 28 213 390 156 77 114 346 181 388 35 312 281 271 311 76 367 85 89 201 197 220 387 182 199 166 386

## IV. Wykresy błędów względnych dla każdego pliku

Porównanie błędów względnych dla różnych wartości współczynnika  $a$ :

niebieski -  $a = 0,999999$

zielony -  $a = 0,9999$

czerwony -  $a = 0,99$

